

Calandrage d'un Mélange Polymérique Elastoviscoplastique

A. OUIBRAHIM^a et B. MADANI^{a, b}

^aLaboratoire d'Energétique Mécanique et Matériaux, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, Algérie.

^bDépartement de Mécanique, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université M'hamed Bougarra, Boumerdès, Algérie.

Résumé

Une des solutions qui participe à la protection de l'environnement est, désormais, le recyclage de matériaux, notamment polymériques. Il y a comme conséquence (très positive) la réduction de la consommation de l'énergie fossile servant justement à la fabrication de polymères. Ainsi, il est ici envisagé le mélange de polymères ayant différentes propriétés mécaniques avec comme résultat un polymère au comportement élastoviscoplastique.

Comme première étape, avec l'idée d'un mélange, nous élaborons un modèle rhéologique caractérisant donc des milieux à propriétés élastoviscoplastiques. Comme deuxième étape, ce nouveau matériau; issu d'un mélange de plusieurs polymères, viscoélastiques d'une part et pseudo plastiques d'autre part, est utilisé dans le processus de calandrage qui permet de réaliser des feuilles à travers deux cylindres en contre rotation.

Les solutions des systèmes d'équations complexes, découlant à la fois des lois de comportement et de la dynamique associée à la géométrie du calandrage, nécessitent plutôt un traitement numérique via l'adaptation du logiciel Fluent initialement destiné aux fluides newtoniens et non newtoniens mais non viscoélastiques. Le champ de pression prévalant dans le calandrage est ici calculé et analysé pour différents paramètres géométriques et mécaniques (espace entre les deux cylindres, indice de fluidité, concentration en viscoélasticité).

Abstract

Henceforward, the recycling of wasted material constitutes one of the solutions contributing to the environment protection. One of the (positive) consequences is the reduction of the fossil energy consumption, especially used to produce brand new polymers. For example, brand new polymers are then substituted by polymer blends using appropriate wasted materials. Thus, we here manage to consider rather a blend of several kinds of polymer having different mechanical properties so that, as a main objective, the final result is an elastoviscoplastic polymer blend.

Therefore, as a first step, we formulate a rheological model as a blend of different types of polymers (viscoelastic and pseudo-plastic) contributing to describe the behaviour of the final result above looked for. The second step is to test the obtained polymer blend in the calendering process used to produce thin sheets (of plastic for example) towards two counter rotating cylinders.

The complexity of the associated equations of motion, as a result of the proposed rheological model together with the geometrical configuration of the flow, needs to be numerically treated. For this purpose, we use a commercial software Fluent, initially devoted for Newtonian as well as non Newtonian but purely viscous fluids that we adapt to our problem via the incorporation of UDF (User Defined Functions). The distribution of the pressure field prevailing in the gap between the two counter rotating cylinders is then determined and analyzed through the effects of different geometrical as well as mechanical parameters (gap size, fluidity index, viscoelasticity concentration).

Mots Clés: calandrage, élastoviscoplastique, mélangeur à deux cylindres, polymère, rhéologie.

Introduction

Le calandrage de matériaux constitue une technique industrielle très importante et très utilisée : dans l'agro-alimentaire, les feuilles de papier, d'élastomères, de plexiglas, d'acier, etc. Ce procédé a fait l'objet de

nombreuses recherches à commencer par Ardichivili in 1938 [1]. Il reste que la plupart des travaux ont considéré des milieux newtoniens, voire non newtoniens mais purement visqueux de type loi de puissance (pseudo-plastique) [2 à 6]. En milieu viscoélastique, il y eut Paslay [7] qui considéra un fluide d'Oldroyd à trois paramètres, avec cependant une solution approchée. Le constat final est que la plupart des milieux considérés dans le calandrage sont soit purement visqueux, pseudo-plastique en loi de puissance, soit viscoélastiques mais jamais à la fois élastoviscoplastiques.

Ainsi, dans cette étude notre investigation porte sur deux objectifs : a) produire un modèle pour un matériau polymérique issu en fait d'un mélange de polymères pour les uns viscoélastiques et pour les autres pseudo-plastiques; b) à titre d'application, considérer le calandrage d'un matériau dont la loi de comportement est décrite par le modèle élastoviscoplastique ainsi établi.

Modélisation – Loi de Comportement

Le modèle rhéologique a été établi [8 à 11] sur la base d'un mélange de deux polymères l'un est viscoélastique, suivant le modèle B d'Oldroyd, à concentration donnée α , tandis que le second est un polymère pseudo-plastique de type loi de puissance généralisée, conduisant en final à la loi de comportement élastoviscoplastique suivante :

$$\tau_{ij} + \lambda \frac{D\tau_{ij}}{Dt} = \left[2\alpha\mu + (1-\alpha)\mu_a + \lambda(1-\alpha) \frac{D\mu_a}{Dt} \right] D_{ij} + [2\alpha\mu\lambda_r + \lambda(1-\alpha)\mu_a] \frac{DD_{ij}}{Dt} \quad (1)$$

où $\frac{D}{Dt}$ est la dérivée convective ou dérivée d'Oldroyd, D_{ij} les composantes du tenseur des taux de déformation, τ_{ij} les composantes du tenseur déviateur des contraintes, λ et λ_r les temps de relaxation et de retardation respectivement, μ la viscosité Newtonienne, tandis que la viscosité apparente μ_a a pour expression :

$$\mu_a = K \left(\frac{1}{2} I_2 \right)^{n-1} \quad (2)$$

où K et n désignent la consistance et l'indice de fluidité respectivement, alors que I_2 est le second invariant du tenseur des taux de déformations.

Application – Procédé de Calandrage

Equations Hydrodynamiques

Nous considérons à présent un matériau élastoviscoplastique, dont les équations constitutives obéissent au modèle rhéologique caractérisé par les relations (1) et (2), soumis au processus de calandrage à travers deux cylindres, de longueur suffisamment grande pour négliger les effets de bord, de rayon R et en mouvement de contre rotation tel que schématisé sur la figure 1.

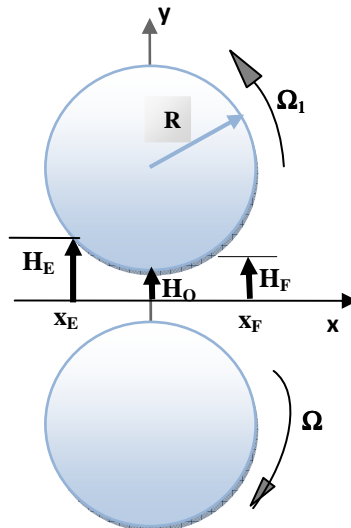


FIG. 1 : Schéma du calandrage caractérisé par deux cylindres en contre rotation.

Le mouvement du polymère fondu est considéré comme bidimensionnel, permanent et isotherme. Il en résulte évidemment les équations suivantes de mouvement :

Equation de continuité.

$$\frac{\partial V_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

avec pour vitesse: $\vec{V} = \{u(x, y), v(x, y)\}$

Equations de quantité de mouvement

$$\rho \frac{dV_i}{dt} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (4)$$

où ρ désigne la masse volumique du mélange polymérique fondu, p la pression et τ_{ij} les composantes du tenseur déviateur des contraintes des équations constitutives exprimées par (1).

Conditions aux limites

Les conditions aux limites sont données à l'entrée et à la sortie où l'on désigne par H_E l'épaisseur d'entrée de la feuille et H_F son épaisseur de sortie tandis que X_E et X_F désignent la localisation longitudinale de chacune de ces épaisseurs. Par ailleurs, étant donné les dimensions très grande du rayon de chacun des cylindres devant l'entrefer, distance entre les deux cylindres, autrement dit l'épaisseur $H(x)$ du film (ou feuille) est très petite devant R ; on suppose alors que cette épaisseur $H(x)$ est donnée par :

$$H(x) = H_0 \left(1 + \frac{x^2}{2RH_0} \right) \quad (5)$$

où H_0 désigne la demi distance minimale entre les deux cylindres.

Les conditions aux limites portent aussi sur le champ de vitesse (on suppose qu'il n'y a pas de glissement sur les cylindres), et sur la pression entre l'entrée et la sortie, soit donc :

- $V = U$ (vitesse tangentielle) pour $y = H(x)$
- $p(x_E) = p(x_F)$

Résolution Numérique

L'autre problème majeur de cette étude est la résolution numérique des équations ci-dessus. En fait l'un des challenge ici est d'adapter le logiciel Fluent 6.3, couramment utilisé en CFD pour des milieux newtoniens, pour résoudre des équations d'un milieu plutôt non newtonien et plus est élastoviscoplastique.

Cette adaptation a été possible en complétant ce logiciel par des UDF (User Defined Functions) pour tenir compte des lois constitutives (1) du milieu.

Résultats et Discussion

Milieu Newtonien

Pour valider le modèle ici proposé, nous l'utilisons en le réduisant dans l'équation (1) à un modèle newtonien en prenant juste $\alpha = 0$ (pas de viscoélasticité) et $n = 1$, puis en comparant les résultats à ceux trouvés par Agassant [2001] pour un modèle newtonien.

Les calculs ont été effectués en considérant les données suivantes : $H_0 = 0,01\text{mm}$, $U = 0,15\text{m/s}$ (vitesse tangentielle des cylindres) et $\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3$.

Ainsi, les résultats relatifs à la distribution du champ de pression entre les deux cylindres pour différents rapports H_F/H_0 (facteur très significatif pour l'amplitude de la pression), figure 2, est en plein accord, [10], avec les résultats obtenus par Agassant [(2001)].

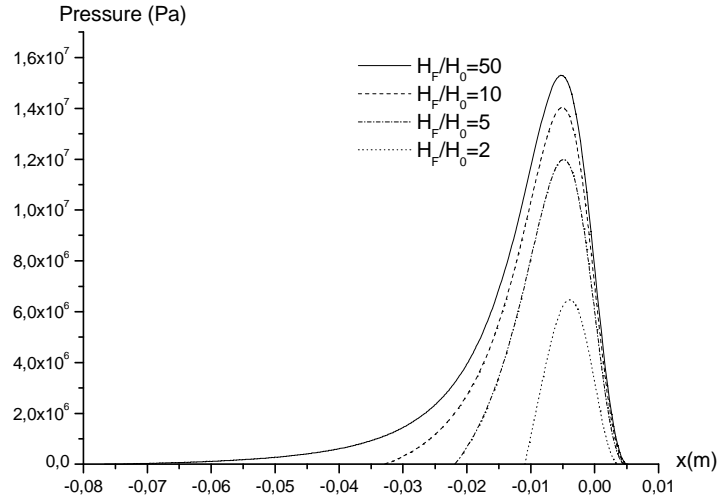


FIG. 2: Distribution de la pression le long de l'entrefer pour différentes valeurs de l'épaisseur relative de la feuille H_F/H_0 .

Milieu en Loi de Puissance

Comme deuxième validation de nos résultats numériques, nous réduisons notre modèle cette fois ci à un milieu en loi de puissance en considérant dans l'équation (1) : $\alpha = 0$ mais $n \neq 1$ afin de faire encore la comparaison de nos résultats avec ceux trouvés par Agassant [(2001).] pour un fluide en loi de puissance cette fois ci.

La figure 3 indique dans ce cas la distribution de la pression correspondant à différentes valeurs de l'indice de fluidité n . Là encore, les résultats trouvés sont en accord, [10], avec ceux obtenus par Agassant [(2001).]. On remarquera notamment la décroissance importante de la pression quand l'indice de fluidité décroît ainsi que la similitude des amplitudes de variation de la pression. Ce qui signifie que la pression est d'autant plus basse que l'indice de fluidité est faible ou encore que le milieu est rhéofluidifiant.

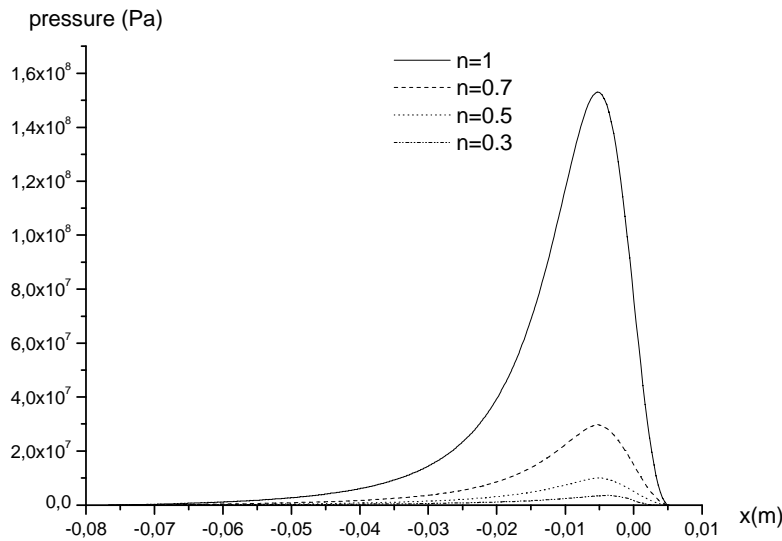


FIG. 3: Distribution de la pression pour différentes valeurs de l'indice de fluidité.

Milieu Elastoviscoplastique

Dans ce cas, on s'intéresse à la viscoélasticité du milieu et désormais dans le modèle on prendra $\alpha \neq 0$ et $n \neq 1$.

Comme précédemment, nous considérons les mêmes données cinématique et géométrique tandis que pour la viscoélasticité et autres caractéristiques du polymère fondu on prend : $\mu = 10^3 \text{ Pa.s}$; $\lambda = 10^{-2} \text{ s}$, $\lambda/\lambda_r = 0,4$, $K = 10^3 \text{ Pa.s}$ et $n = 0,7$.

Les simulations numériques ont été conduites pour plusieurs valeurs de la concentration α en viscoélasticité. La courbe 4 indique à ce propos que l'augmentation de la contribution en viscoélasticité dans le milieu (α variant de 0 à 1) conduit à augmenter le maximum de la pression

Il est bien important de faire remarquer par ailleurs sur la figure 4 que si l'on décroît α jusqu'à $\alpha = 0$, on retrouve exactement la distribution de pression pour un milieu en loi de puissance (avec $n = 0,7$), tandis que pour $\alpha = 1$, il ne reste plus que la contribution viscoélastique dans le polymère fondu.

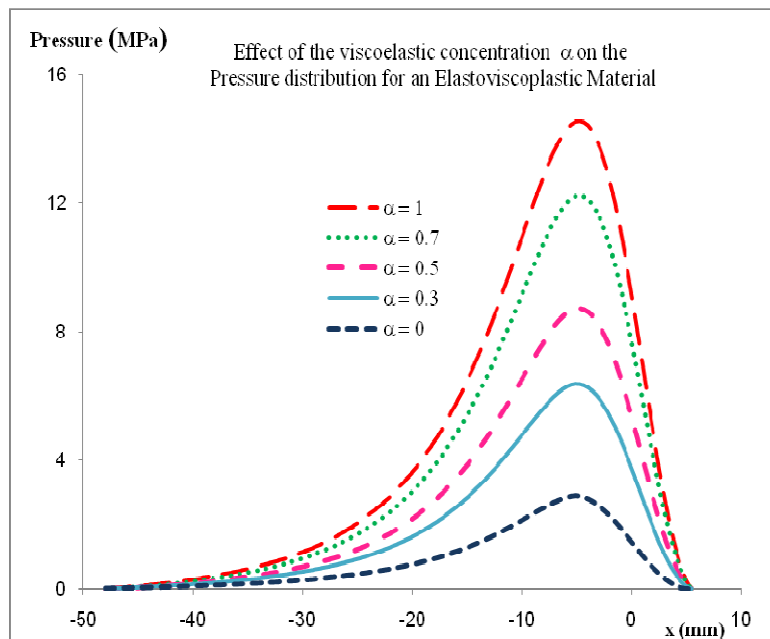


FIG. 4 : Distribution de la pression pour différentes concentration α en viscoélasticité et avec $H_F/H_0 = 20$

Conclusion

Nous avons présenté ici un modèle rhéologique pour des matériaux aux propriétés élastoviscoplastiques.

Il est élaboré comme le résultat d'un mélange de différents matériaux caractérisés pour les uns par un comportement viscoplastique que peut décrire un modèle généralisé en loi de puissance et pour les autres par un comportement viscoélastique du type modèle B d'Oldroyd.

Le calandrage est ensuite utilisé dans le cadre de l'application de ce modèle. La résolution des équations associées a été effectuée numériquement utilisant pour ce faire un logiciel en volumes finis Fluent 6.3 que nous avons alors adapté via des UDF (User Defined Functions) car conçu à la base pour des fluides purement newtoniens.

Les calculs ont été effectués en testant le modèle d'abord comme fluide Newtonien (en considérant l'indice de fluidité $n = 1$ et $\alpha = 0$ dans la loi de comportement) puis comme modèle pseudo-plastique en loi de puissance généralisée (en prenant dans ce cas n variable, avec $n < 1$, en lui associant là encore $\alpha = 0$). Les résultats obtenus sont en parfait accord avec ceux publiés dans la littérature. Ces résultats et les comparaisons correspondantes valident ainsi le modèle et la procédure numérique utilisée.

En considérant le modèle dans son ensemble élastoviscoplastique (alors $\alpha \neq 0$ et $n \neq 1$), les calculs numériques ont montré que la concentration α en viscoélasticité a une influence significative sur la distribution du champ de pression. En effet, l'augmentation en concentration de la partie viscoélastique du mélange conduit à augmenter l'amplitude de la distribution de pression entre les deux cylindres.

References

- [1] Ardichivili
- [2] Gaskel, R. E.; The Calendering of Plastic, J. Appl. Mech. (1950).
- [3] Chong J. S.; Calendering Thermoplastic materials, J. Appl. Polym. Sci., 12, pp. 191-212, (1968).
- [4] Alston W. W. and Astill K. N.; Calendering of Non Newtonian Fluid, J. Appl. Polymer. Sc., 17, pp. 3157-3174, (1973).
- [5] Agassant J. F., Espy M., Theoretical and Experimental Study of the Molten Polymer Flow in the Calender Bank, Polym. Ing. Sci. , 25, pp. 113-121, (1985).
- [6] Agassant J. F., Calandrage, Techniques de l'Ingénieur, (2001).
- [7] Paslay P. R.; Calendering of an Elastoviscous Materials, PhD thesis, (1955).
- [8] Madani B. et Ouibrahim A., Modélisation Rhéologique d'un Mélange Elastoviscoplastique via un Mélangeur Physique à Chaud, Conférence Internationale sur le Génie des Procédés, CIGP'07, Bejaïa Octobre, (2007).
- [9] Madani B. et Ouibrahim A., Calendering Process Numerical Simulation with an Elastoviscoplastic Polymer Blend Model, 4th International Conference on Advanced Computational Engineering and Experimenting ACE-X 2010, Paris July (2010), accepted for publication .
- [10] Madani B. and Ouibrahim A., Calendering Process Numerical Simulation with an Elastoviscoplastic Polymer Blend Model., to be published as Book Chapter in '**Materials with Complex BehaviourII**', Springer-Verlag, Germany (2011).
- [11] Madani B., Étude Numérique d'un Mélange Polymérique dans un Mélangeur Physique à Chaud, Thèse de doctorat (en cours), Univ.de Boumerdès (2011).